

Выбор основных размеров и параметров
однофазных асинхронных микродвигателей.
Расчет вспомогательной обмотки однофазных
асинхронных микродвигателей.

Доктор технических наук, профессор Ю. С. Чечет
Московский энергетический институт им. Молотова.

По публикации журнала "Электричество", 1948 г. №11 и 1949 г. №2

Основными типами однофазных асинхронных микродвигателей с расщепленной фазой являются:

- 1) конденсаторные двигатели (с длительно включенной емкостью во вспомогательной обмотке);
- 2) двигатели с конденсаторным пуском;
- 3) двигатели с реостатным пуском (с добавочным сопротивлением в пусковой обмотке).

В двух последних конструкциях пусковая обмотка при достижении определенной скорости (обычно 75–85% от номинальной) отключается центробежным выключателем и двигатель продолжает работать как однофазный. Таким образом, в двигателях типов 2 и 3 геометрические размеры и эксплуатационные показатели – вращающий момент, скольжение, перегрузочная способность, η и коэффициент мощности, определяются только соответствующим выбором рабочей обмотки, тогда как пусковые свойства, кратность пускового момента и кратность пускового тока зависят от параметров обеих обмоток. В конденсаторных двигателях как эксплуатационные, так и пусковые показатели зависят от параметров обеих обмоток. В настоящей статье рассматривается определение основных размеров машины и выбор параметров главной обмотки.

Выбор основных размеров.

Произведение $D^2 \times l$ можно определить по обычному уравнению:

$$\frac{D^2 \times l}{P} = \frac{8,6 \times 10^8}{B\delta \times AS} \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр статора, см., l – длина статорного пакета, см.; n – синхронная скорость вращения, об./мин., $B\delta$ – амплитуда магнитной индукции в воздушном зазоре, Gs (гаусс); AS – линейная нагрузка статора $A/\text{см.}$, P – кажущаяся мощность потребляемая двигателем из сети, VA , β – коэффициент, определяющий степень использования машины по сравнению с многофазным двигателем тех же размеров.

Как известно, при заполнении главной обмоткой половины всех пазов статора (что имеет место в подавляющем большинстве случаев) отношение мощностей двухфазной и однофазной машин одинаковых размеров составляет при допущении равенства токов $\beta = 2$, при допущении же равенства потерь в меди статора обеих машин $\beta = \sqrt{2} = 1,42$. Последнее допущение предполагает, что тепло, выделяющееся в обмотке, беспрепятственно передается стенкам паза и равномерно распределяется по всему пакету. Несмотря на незначительную толщину проводниковой и пазовой изоляции микродвигателей, это условие не осуществимо, и практически для двигателей типов 2 и 3 можно принимать $\beta = 1,6$. В конденсаторных микродвигателях, при правильном подборе конденсаторов, в работе участвуют в одинаковой мере обе обмотки, здесь можно принимать $\beta = 1$.

При проектировании машин в реальных условиях гораздо большее значение имеет установление наружного, а не внутреннего диаметра статора, так как раскрой листов должен производиться с минимальными отходами. Отношение внутреннего диаметра к наружному, согласно анализу большого числа серий микродвигателей, представляет собой достаточно стабильную величину, составляющую для:

двухполюсных машин $k_D = D/D_a \approx 0,5$, для четырехполюсных $k_D = D/D_a \approx 0,6$.

Подставляя в (1) $D = k_D \times D_a$, получим:

$$D_a^2 \times l = \frac{8,6 \times \beta \times P \times 10^8}{B\delta \times AS \times k_D^2 \times n} = \beta \times C \times P \quad (2)$$

где для двухполюсных машин:

$$C = \frac{11,5 \times 10^5}{B\delta \times AS} \quad (3, a)$$

для четырехполюсных:

$$C = \frac{16 \times 10^5}{B\delta \times AS} \quad (3, б)$$

Подводимая к двигателю мощность:

$$P = \frac{P_2}{\eta \times \cos\varphi} \quad (4)$$

где P_2 – полезная мощность на валу, η – коэффициент полезного действия, $\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

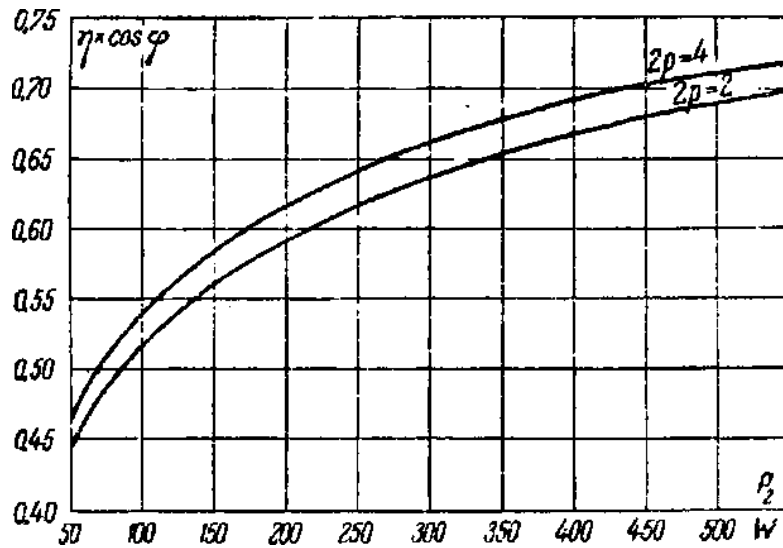


Рис. 1.

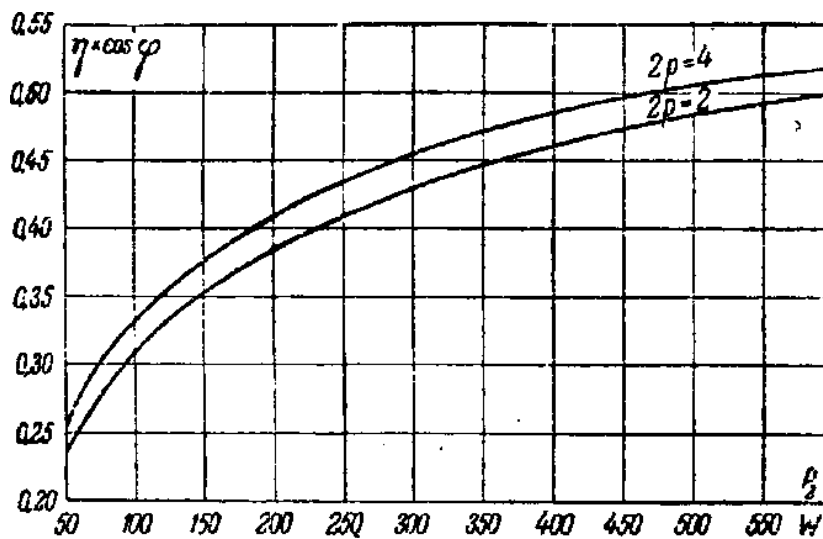


Рис. 2.

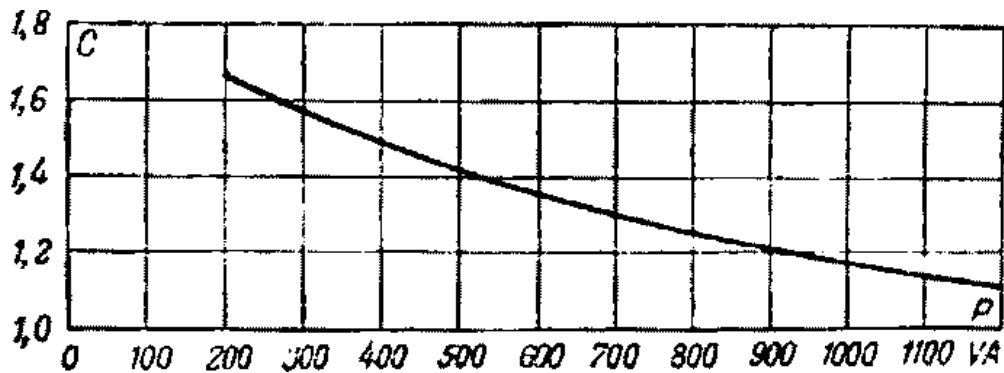


Рис. 3.

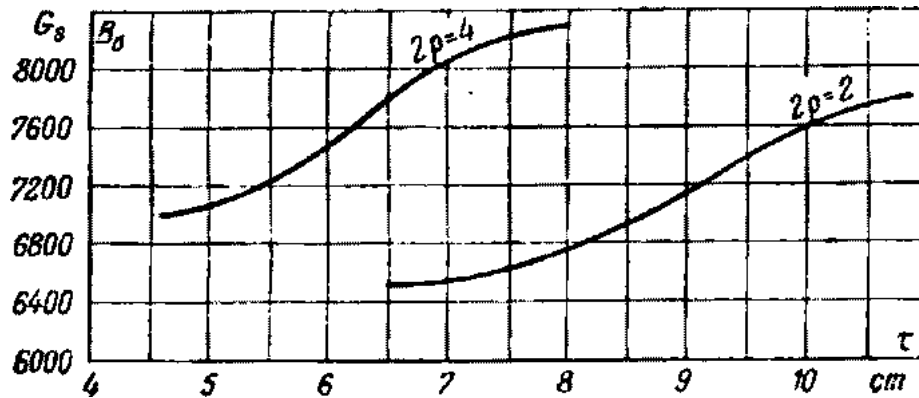


Рис. 4.

На рис. 1 даны кривые $\eta \times \cos\varphi$ для двух- и четырехполюсных конденсаторных микродвигателей, а на рис. 2 – для двигателей с конденсаторным и реостатным пуском мощностью до 550 Вт. Кривые построены по средним для большого числа современных серий значениям произведения $\eta \times \cos\varphi$. Кривые рис. 3 показывают значения постоянной C , вычисленные для тех же двигателей. Отклонения от этих средних величин не превышают $\pm 10 - 15\%$. Из (3 а) и (3 б) непосредственно следует, что чем меньше C , тем больше произведение $B\delta \times AS$, т. е. тем больше использована машина с точки зрения электромагнитных нагрузок. На кривых рис. 4 приведены значения магнитной индукции в воздушном $B\delta$ зазоре для тех же машин в функции числа полюсов и полюсного деления:

$$\tau = \frac{\pi \times D}{2p} \quad (5)$$

Линейная нагрузка в микродвигателях колеблется в пределах 120 – 200 А/см., На основании (2):

$$\beta \times C \times P = D_a^2 \times l = D^2 \times \lambda \times \tau = D_a^2 \times \lambda \times \frac{\pi \times D}{2p} = D_a^3 \times \lambda \times \frac{\pi \times k_D}{2p}$$

или

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{\beta \times C \times P \times 2p}{\lambda \times \pi \times k_D}} \quad (6)$$

где отношение $\lambda = l/\tau$ составляет для двухполюсных машин $\lambda = 0,6 - 1,0$, в среднем 0,8, для четырехполюсных: $\lambda = 1,0 - 1,4$, в среднем 1,2. Подставляя эти значения, а также величину k_D в (6), находим для двухполюсных машин:

$$Da = (1,08 \div 1,28) \times \sqrt[3]{\beta \times C \times P} \quad \text{в среднем } 1,18 \times \sqrt[3]{\beta \times C \times P}$$

для четырехполюсных:

$$Da = (1,15 \div 1,27) \times \sqrt[3]{\beta \times C \times P} \quad \text{в среднем } 1,21 \times \sqrt[3]{\beta \times C \times P}$$

Таким образом, в среднем для всех микродвигателей:

$$Da \approx 1,2 \times \sqrt[3]{\beta \times C \times P} \quad (7)$$

Окончательное значение Da устанавливается исходя из условий наиболее экономичного раскроя листов. Допуская припуск на штамповку на обе стороны 5 мм., получаем при резке стандартного листа 750×1500 мм. на одинаковые полосы шириной 75, 83, 94, 107, 125, 150 мм. возможные диаметры = 70, 78, 89, 102, 120, 145 мм. На основании (2) длина пакета:

$$l = \frac{\beta \times C \times P}{D_a^3} \quad (8)$$

Приведенные уравнения и кривые позволяют установить следующий порядок определения основных размеров и электромагнитных нагрузок.

- 1) по (4), пользуясь кривыми рис. 1 или рис. 2 определяется подводимая мощность P .
- 2) по кривым рис. 3 выбирается постоянная C .
- 3) по (7) определяется наружный диаметр Da и выбирается ближайшее к найденному значение, удовлетворяющее приведенному выше ряду;
- 4) по (8) определяется длина пакета l .
- 5) по уравнению:

$$D = k_D \times Da \quad (9)$$

где $k_D = 0,5$ для двухполюсных и $k_D = 0,6$ для четырехполюсных машин находится внутренний диаметр статора D .

- 6) на основании уравнения (3а) или (3б) определяется произведение для двухполюсных машин:

$$B\delta \times AS = \frac{11,5 \times 10^5}{C}$$

для четырехполюсных машин:

$$B\delta \times AS = \frac{16 \times 10^5}{C}$$

- 7) по кривым рис. 4 выбирается индукция $B\delta$ и определяется величина линейной нагрузки AS .

Расчет главной статорной обмотки и обмотки ротора.

Одной из важнейших задач рационального проектирования микродвигателей является обеспечение надлежащей перегрузочной способности, т. е. отношения максимального вращающего момента к номинальному:

$$m_m = \frac{M_m}{M_n}$$

По ГОСТ 183–41 величина m_m для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором должна быть не ниже 1,65. Однако анализ выполненных машин показывает, что в большинстве случаев микродвигатели с расщепленной фазой имеют $m_m = 2 - 3$.

Как известно, перегрузочная способность многофазных асинхронных машин однозначно зависит от скольжения s_H при номинальном моменте, скольжения s_m при максимальном моменте, отношения активных сопротивлений статорной и роторной обмоток. Эта зависимость определяется известной формулой

$$m_m = \frac{\frac{s_H}{s_m} + \frac{s}{s_H} + \gamma \times s_m}{2 + \gamma \times s_m} \quad (10)$$

где

$$\gamma = \frac{2 \times R_s}{R_R}$$

В последнем уравнении R_s – активное сопротивление обмотки статора и R_R – приведенное к ней активное сопротивление обмотки ротора. Формула (10) выведена для случая кругового вращающегося поля, для однофазных же двигателей, которое в общем случае является эллиптическим (для конденсаторных двигателей поле будет круговым лишь при одном единственном скольжении), она, строго говоря, неприменима. Однако, для микродвигателей нормального исполнения, у которых s_m имеет величину 0,2 – 0,3, поле обратной последовательности в диапазоне скольжений от s_H до s_m настолько мало отражается на величине момента (но не тока!), что этим влиянием можно пренебречь и пользоваться без опасения получить заметную ошибку приведенной формулой (10). Отношение γ для микродвигателей лежит обычно в пределах 1,0 – 2,0. Если воспользоваться в (10) только наибольшим значением $\gamma = 2$, то возможная ошибка оказывается весьма малой (в наименее благоприятном случае около 4%). Таким образом, вполне допустимо во всех случаях пользоваться уравнением:

$$m_m = \frac{\frac{s_H}{s_m} + \frac{s}{s_H} + 2 \times s_m}{2 + 2 \times s_m} \quad (11)$$

решая которое относительно s_m , находим:

$$s_m = \frac{-m_m \times s_H - s_H \times \sqrt{m_m^2 + 2 \times m_m - 2 \times s_H - 1}}{2 \times m_m \times s_H - 2 \times s_H - 1} \quad (12)$$

На рис. 5 показаны построенные по этому уравнению кривые $s_m = f(s_H)$ при различных значениях m_m . Следовательно, задавшись величиной номинального скольжения (обычно $s_H = 0,04 - 0,06$) и величиной перегрузочной способности (обычно $m_m = 2,4 - 2,6$), легко определить скольжение при максимальном моменте. Дальнейшая задача состоит в том, чтобы выбрать параметры обмоток обеспечивающие требуемое скольжение. Для установления связи между s_m и параметрами обмоток следует воспользоваться какой-либо круговой диаграммой однофазного двигателя, например упрощенной диаграммой Брансона, анализируя которую, можно найти следующее выражение:

$$s_m = 1 - \sqrt{1 - 1,01 \times \frac{R_R}{X_K} \times \operatorname{tg} \alpha} \quad (13)$$

где

$$\alpha = \operatorname{arccctg} \times \frac{R_R}{X_K} \quad (14)$$

X_k – реактивное сопротивление короткого замыкания, равное $X_s + X_R$. Формула (13) дает хорошее совпадение с результатами исследования большого количества машин. Для упрощения пользования этим уравнением по нему построена кривая $s_m = f \times \frac{R_R}{X_k}$ показанная на рис. 6.

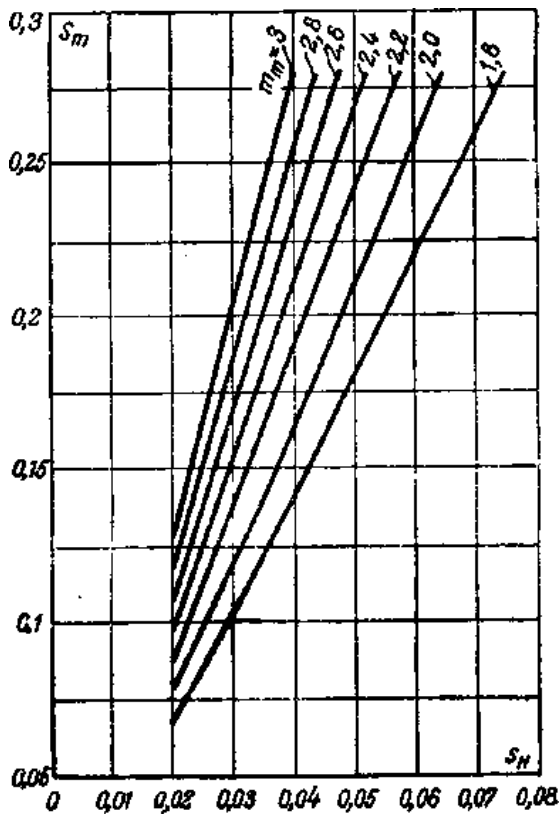


Рис. 5.

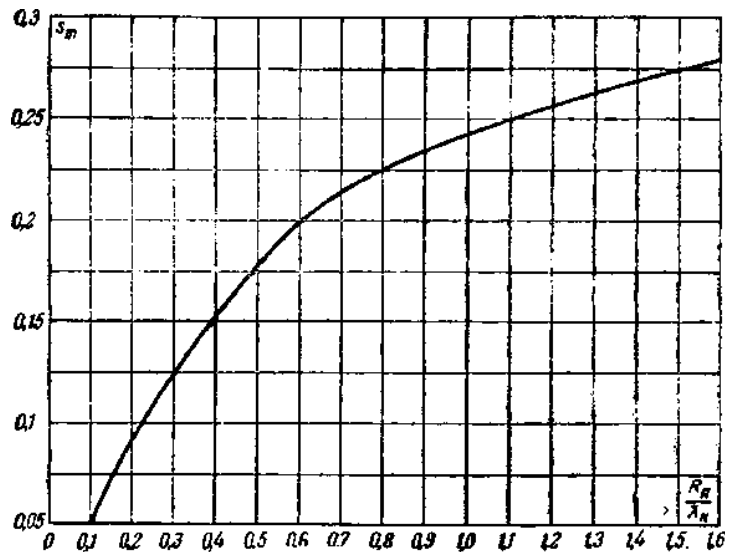


Рис. 6.

Таким образом, можно установить следующий порядок расчета параметров обмоток микродвигателя для получения заданной перегрузочной способности:

1. Определяются (по обычным формулам) активное и индуктивное сопротивления главной статорной обмотки R_s и X_s . В случае конденсаторного микродвигателя главная обмотка рассчитывается как обмотка одной фазы симметричного двухфазного двигателя, т. е. двигателя, имеющего две одинаковые статорные обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° электрических градусов, питаемые двумя одинаковыми по величине токами, сдвинутыми во времени на 90° . Мощность этого эквивалентного двигателя равна мощности конденсаторного двигателя.
2. Выбирается скольжение при номинальной нагрузке и по заданной перегрузочной способности устанавливается с помощью кривых рис. 5 необходимое скольжение s_m .
3. Принимаются предварительно $X_k = 2 \times X_s$ и по кривым рис. 6 определяется отношение $\frac{R_R}{X_k}$, а следовательно и R_R .
4. По R_R и принятому (на основании известных соображений) числу пазов ротора N_R определяется необходимое сопротивление одного элемента роторной клетки:
для конденсаторных двигателей:

$$R_a = \frac{R_R \times N_R}{8 \times w_s^2 \times k_s^2} \quad (15)$$

для двигателей с отключаемой пусковой обмоткой:

$$R_a = \frac{R_R \times N_R}{4 \times w_s^2 \times k_s^2} \quad (16)$$

где w_s – число витков, а k_s – обмоточный коэффициент обмотки статора. Как известно,

$$Ra = R_{cm} + \frac{N_R^2}{2 \times \pi^2 \times p^2} \times R_{кл} \quad (17)$$

где R_{cm} – сопротивление одного стержня, $R_{кл}$ – сопротивление элемента кольца, заключенного между осями двух соседних стержней.

5. Подбираются стержни и кольца так, чтобы их активные сопротивления удовлетворяли (17), а сечения были достаточными по условию нагрева.

6. По известным формулам определяется приведенное индуктивное сопротивление ротора X_R .

7. Проверяется значение индуктивного сопротивления короткого замыкания $X_k = X_s + X_R$ и если оно не совпадает по величине с принятыми ранее, по нему снова устанавливается при помощи кривых рис. 6 требуемое значение R_R . В случае расхождения несколько изменяется сечение роторных стержней и колец, пока не получится достаточное совпадение. Обычно уже после первого пересчета результаты получаются вполне удовлетворительными.

Дальнейший расчет машины (магнитная цепь, потери и т. д.) производится по одной из общепринятых методик.

Пример. Найдем основные размеры, электромагнитные нагрузки и параметры ротора для четырехполюсник микродвигателя с конденсаторным пуском, мощности 100 Вт.

По кривым рис. 2 $\eta \times \cos\varphi = 0,33$. Тогда $P = 100/0,33 = 300$ ВА. По кривым рис. 3 $C = 1,57$. При $\beta = 1,6$

$$Da \approx 1,2 \times \sqrt[3]{1,6 \times 1,57 \times 300} = 10,4 \text{ см.}$$

Ближайшим пригодным размером будет $Da = 10,2$ см. Тогда

$$D = 0,6 \times 10,2 = 6,7 \text{ см.} \quad l = \frac{1,6 \times 1,57 \times 300}{10,2^2} = 7,25 \text{ см.}$$

$$\tau = \frac{\pi \times 6,7}{4} = 5,26 \text{ см.}, \quad B\delta \times AS = \frac{16 \times 10^5}{1,57} = 1019108$$

По рис. 4 $B\delta = 7150$ Гс и следовательно:

$$AS = \frac{1019108}{7150} = 142 \text{ А/см.}$$

При дальнейшем расчете найдем следующие параметры главной статорной обмотки: $R_s = 2,932$ Ом и $X_s = 3,59$. Примем $m_m = 2,0$ и $s_H = 0,055$. По кривым рис. 5 $s_m = 0,235$ и по кривой рис. 6 $\frac{R_R}{X_k} = 0,9$, что дает $R_R = 0,9 \times 2 \times 3,59 = 6,45$ Ом.

После подбора стержней и колец найдено $R_R = 6,4$ Ом и $X_R = 3,46$ Ом, что дает $X_k = 3,59 + 3,46 = 7,05$ Ом. При этом значении X_k ротор должен иметь сопротивление $R_R = 0,9 \times 7,0 = 6,35$ Ом. После некоторого изменения размеров стержней и колец получаем величины $R_R = 6,35$ Ом и $X_R = 3,46$ Ом, на которых и останавливаемся.

Расчет вспомогательной обмотки однофазных асинхронных микродвигателей.

В предыдущем разделе определена методика расчета основных размеров однофазных асинхронных микродвигателей и выбора параметров главной обмотки.

Здесь рассматривается расчет параметров вспомогательной цепи двигателя, вспомогательной обмотки и добавочного элемента (конденсатор, сопротивление), обеспечивающего появление вращающего момента при пуске в ход (двигатели с отключаемой пусковой обмоткой) или служащего как для целей пуска, так и для улучшения рабочих свойств машины (конденсаторные двигатели).

Следующие параметры главной цепи A мы будем в дальнейшем считать известными: активное и индуктивное сопротивления статорной обмотки R_{SA} , X_{SA} ; активное и индуктивное сопротивления роторной обмотки, приведенные к числу витков главной статорной обмотки R_{RA} , X_{RA} ; индуктивное сопротивление, обусловленное взаимной индуктивностью главной статорной и роторной обмотки, X_m .

Конденсаторный микродвигатель.

Введем следующие обозначения для параметров вспомогательной обмотки (5) и конденсатора: R_{SB} , X_{SB} – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора; R_{RB} , X_{RB} – активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к числу витков вспомогательной обмотки статора; R_C , X_C – активное и емкостное сопротивления конденсатора. Тогда параметры всей вспомогательной цепи статора в целом:

$$R'_{SB} = R_{SB} + R_C$$

$$-X'_{SB} = X_{SB} - X_C$$

Сопротивление X'_{SB} всегда имеет емкостный характер и поэтому снабжено знаком минус. Все эти обозначения показаны на принципиальной схеме конденсаторного двигателя, изображенной на рис. 1.

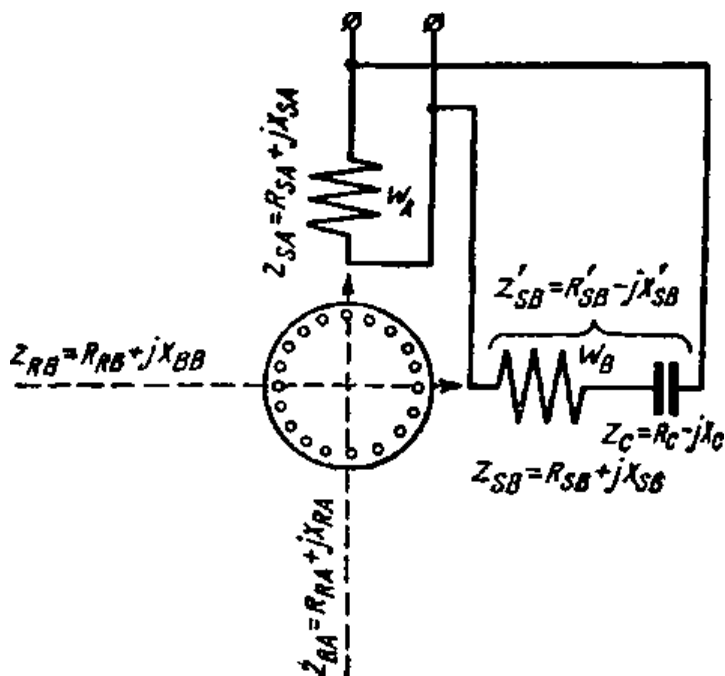


Рис. 1.

Число эффективных витков, т. е. число витков, умноженное на обмоточный коэффициент обмотки A обозначим через w_A , обмотки B через w_B и отношение w_B/w_A через k . Во всех дальнейших выводах будем придерживаться теории разработанной автором на основании метода симметричных составляющих.

Проблема расчета вспомогательной обмотки сводится к решению трех задач:

а) определение коэффициента трансформации k , что дает возможность найти активное и реактивное сопротивления самой вспомогательной обмотки, число ее витков, сечение провода и величину тока в ней.

б) определение емкости рабочего конденсатора из условий оптимального режима работы при номинальной или заданной нагрузке.

в) определение емкости пускового конденсатора из условий заданного пускового режима. Первые две задачи решаются совместно.

Определение k и емкости рабочего конденсатора.

Оптимальным режимом работы двигателя при номинальной или заданной нагрузке является такой, при котором ток обратной последовательности отсутствует и поле становится круговым. Это приводит к условию:

$$I_{A2} = U \times \frac{Z'_{B1} + j \times k \times Z_{A1}}{Z'_{A1} \times Z'_{B2} + Z_{A2} \times Z'_{B1}} = 0 \quad (1.1)$$

или

$$Z'_{B1} + j \times k \times Z_{A1} = 0$$

где:

$$Z'_{B1} = R_{SB} + R_C + R'_{RB1} + j \times (X_{SB} - X_C + X'_{RB1}) \quad (1.2)$$

$$Z_{A1} = R_{SA} + R'_{RA1} + j \times (X_{SA} + X'_{RA1}) \quad (1.3)$$

В свою очередь:

$$R'_{RA1} = \frac{\frac{X_m^2 \times R_{RA}}{S_H}}{\left(\frac{R_{RA}}{S_H}\right)^2 + (X_m + X_{RA})^2} \quad (1.4)$$

$$R'_{RB1} = \frac{(k^2 \times X_m)^2 \times \frac{R_{RB}}{S_H}}{\left(\frac{R_{RB}}{S_H}\right)^2 + (k^2 \times X_m + X_{RB})^2} = \frac{(k^2 \times X_m)^2 \times \frac{R_{RA}}{S_H}}{\left(\frac{R_{RA}}{S_H}\right)^2 + (k^2 \times X_m + X_{RA})^2} = k^2 \times R'_{RA1} \quad (1.5)$$

$$X'_{RA1} = \frac{X_m \times \left(\frac{R_{RA}}{S_H}\right)^2 + X_m \times X_{RA} \times (X_m + X_{RA})}{\left(\frac{R_{RA}}{S_H}\right)^2 + (X_m + X_{RA})^2} \quad (1.6)$$

$$X'_{RB1} = k^2 \times X'_{RA1} \quad (1.7)$$

Подставляя (1.2) и (1.3) в (1.1) и приравнявая к нулю отдельно действительную и мнимую части получаем два уравнения:

$$R_{SB} + R_C + R'_{RB1} - k \times X_{SA} - k \times X'_{RA1} = 0$$

$$X_{SB} - X_C + X'_{RB1} + k \times R_{SA} + k \times R'_{RA1} = 0$$

или

$$R_{B1} + R_C - k \times X_{A1} = k^2 \times R_{A1} + R_C - k \times X_{A1} = 0 \quad (1.8)$$

$$X_{B1} - X_C + k \times R_{A1} = k^2 \times X_{A1} - X_C + k \times R_{A1} = 0 \quad (1.9)$$

Решая (1.8) и (1.9) находим:

$$k = \frac{X_{A1} + \sqrt{X_{A1}^2 - 4 \times R_{A1} \times R_C}}{2 \times R_{A1}} \quad (1.10)$$

$$|X_C| = k \times R_{A1} + k^3 \times X_{A1} \quad (1.11)$$

Таким образом, рассчитав сопротивления:

$$R_{A1} = R_{SA} + R'_{RA1} \quad X_{A1} = X_{SA} + X'_{SA1}$$

и задавшись сопротивлением конденсатора R_C , определяем по (1,10) коэффициент трансформации k , а затем по (1.11) емкостное сопротивление рабочего конденсатора X_C и его емкость C – мкф. Если при этом окажется, что конденсатор найденной емкости обладает активным сопротивлением иным, чем было принято при определении k , расчет нужно повторить, пока не получится совпадение.

Определив k мы тем самым нашли и параметры вспомогательной обмотки, так как:

$$R_{SB} = k^2 \times R_{SA} \quad X_{SB} = k^2 \times X_{SA}$$

Иными словами, вспомогательная обмотка должна быть выполнена из проводника сечением в k раз меньшим, чем у главной обмотки и с числом витков:

$$w_B = k \times w_A$$

Так как ток вспомогательной обмотки:

$$I_B = \sqrt{\frac{1}{k} \times I_A^2}$$

то плотности тока в главной и вспомогательной обмотках имеют одинаковую величину. Найденные параметры позволяют рассчитать:

а) номинальный ток фазы А

$$I_{AH} = \frac{U}{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2}} \quad (1.12)$$

б) номинальный ток фазы В:

$$I_{BH} = \sqrt{\frac{1}{k} \times I_{AH}^2} \quad (1.13)$$

в) номинальный линейный ток:

$$I_H = \sqrt{I_{AH}^2 + I_{BH}^2} \quad (1.14)$$

г) номинальную электромагнитную мощность:

$$P_{12H} = 2 \times I_{AH}^2 \times R'_{RA1} \quad (1.15)$$

д) номинальный вращающий момент:

$$M_H = \frac{97,4 \times P_{12H}}{n} \quad \text{кгс} \times \text{м.} \quad (1.16)$$

е) напряжение на конденсаторе:

$$U_K = I_{BH} \times \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \approx I_{BH} \times X_C \quad (1.17)$$

ж) номинальные потери в меди статора:

$$P_{MSH} = 2 \times I_{AH}^2 \times R_{SA} \quad (1.18)$$

з) номинальные потери в меди ротора:

$$P_{MRH} = s_H \times P_{12H} \quad (1.19)$$

и) номинальные потери в конденсаторе:

$$P_{KH} = I_{BH}^2 \times R_C \quad (1.20)$$

к) номинальную подводимую мощность

$$P_{1H} = P_{12H} + P_{MSM} + P_{KH} + P_{CS} \quad (1.21)$$

где P_{CS} – потери в стали статора.

л) номинальную полезную мощность на валу:

$$P_{2H} = P_{12H} - P_{MRH} - P_{Mex} \quad (1.22)$$

м) номинальный *кпд*:

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} \quad (1.23)$$

н) номинальный коэффициент мощности:

$$\cos\varphi_H = \frac{P_{1H}}{U \times I_H} \quad (1.24)$$

Если взять емкость конденсатора меньшую, чем полученная по расчету, то и в этом случае можно получить удовлетворительные результаты, подобрав по (1.11) новое, очевидно, большее значение k . Конечно, полной симметрии (отсутствия тока обратной последовательности) при этом получить нельзя, так как при изменении k нарушится второе условие симметрии, выражаемое (1.10). Однако, при умеренном уменьшении емкости отклонения получаются небольшими. В этом случае момент, полезная мощность и активная составляющая линейного тока, а также ток в фазе A практически не изменяются, но линейный ток в целом возрастает (за счет уменьшения угла между I_A и I_B), η уменьшается и $\cos\varphi$ падает. Сказанное иллюстрируется векторной диаграммой, показанной на рис. 2, где индексы s относятся к симметричному режиму, а индексы x к измененному, вследствие увеличения коэффициента трансформации k . При увеличении k напряжение на конденсаторе возрастает, и это обстоятельство может свести к нулю всю экономию на величине конденсатора, так как чем выше его рабочее напряжение, тем он дороже. Кроме того, не последнюю роль играет и снижение энергетических показателей (η , $\cos\varphi$), а также увеличение стоимости вспомогательной обмотки (более тонкий проводник, большее число витков, а следовательно, и высокий коэффициент заполнения паза, что затрудняет укладку). Поэтому емкость конденсатора можно уменьшать лишь в небольших пределах, не вызывающих заметного ухудшения эксплуатационных и экономических показателей.

Совершенно очевидно, что симметричный режим работы машины (при сохранении выбранной емкости) имеет место только при той нагрузке, для которой производился расчет, в данном случае при номинальной нагрузке. При всякой другой мощности появляется ток обратной последовательности и возникает поле обратной последовательности. Тем самым расчет поведения машины при других мощностях усложняется.

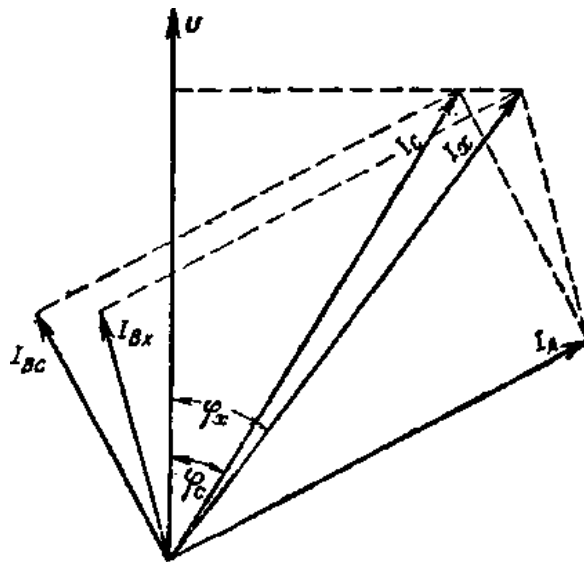


Рис. 2.

Определение емкости пускового конденсатора.

Найденная в предыдущем разделе емкость рабочего конденсатора соответствует оптимальному поведению двигателя лишь при номинальной нагрузке. Если сохранить эту же емкость и при пуске в ход, то кратность пускового момента (отношение пускового момента к номинальному):

$$m_k = \frac{M_k}{M_n}$$

будет иметь значение порядка 0,4 – 0,6, что большинстве случаев недостаточно. Для увеличения m_k необходимо включить в обмотку B во время пуска конденсатор большей емкости (пусковой конденсатор). Практически поступают как показано на рис. 3, т. е. либо включают во время пуска параллельно к рабочему конденсатору C_1 (на рисунке слева) добавочный конденсатор C_2 (обычно электролитический, для уменьшения размеров), который по достижении определенной скорости отключается при помощи центробежного выключателя B , либо (рисунок справа) применяют трансформатор T или автотрансформатор с переменным коэффициентом трансформации, регулирующий эффективную емкость C при помощи центробежного переключателя Π .

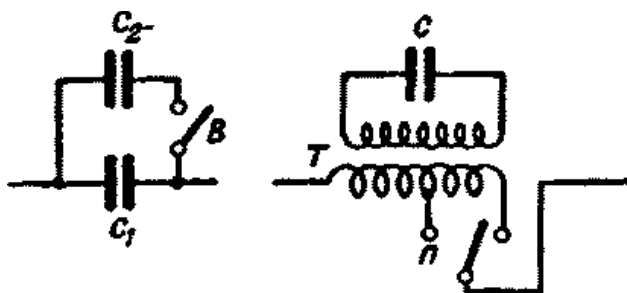


Рис. 3.

Определение величины емкости пускового конденсатора может быть произведено применительно к получению: 1) максимального пускового момента, 2) заданного пускового момента, 3) заданной кратности пускового тока.

Получение максимального пускового момента.

Как ранее было установлено, что вращающий момент:

$$M = \frac{97,4}{n} \times P_{12} = \frac{97,4}{n} \times 2 \times (I^2 \times R'_{RA1} - I_{A2}^2 \times R'_{RA2}) \quad (1.25)$$

где I_{A1} и I_{A2} – токи прямой и обратной последовательности в фазе A , R'_{RA1} определяется по (1.4) и

$$R'_{RA2} = \frac{X_m^2 \times \frac{R_{RA}}{2-s}}{\left(\frac{R_{RA}}{2-s}\right)^2 + (X_m + X_{RA})^2} \quad (1.26)$$

Так как при пуске в ход $s = 1$, то очевидно,

$$R'_{RA} = R_{RA1} = \frac{X_m^2 \times R_{RA}}{R_{RA}^2 + (X_m + X_{RA})^2} \quad (1.27)$$

и (1.25) для этого случая дает:

$$M_K = \frac{97,4}{n} \times 2 \times (I_{A1}^2 - I_{A2}^2) \times R'_{RA1} \quad (1.28)$$

так

$$I^2 - I_{A2}^2 = k \times U^2 \times \frac{R'_{B1} \times X_{A1} - X'_{B1} \times R_{A1}}{(R_{A1}^2 + X_{A1}^2) \times (R_{B1}'^2 + X_{B1}'^2)} \quad (1.29)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_{A1} &= R_{SA} + R'_{RA1} \\ R'_{B1} &= R_{B1} + R_C = R_{SB} + R'_{RB1} + R_C = k^2 \times R_{A1} + R_C \\ X_{A1} &= X_{SA} + X'_{RA1} \\ -X'_{B1} + X_B - X_C &= X_{SB} + X'_{RB1} - X_C = k^2 \times X_{A1} - X_C \end{aligned} \right| \quad (1.30)$$

Знак минус у сопротивления X'_{AB1} указывает, что оно всегда имеет емкостный характер. Подставляя (1.29) в (1.28), получим пусковой момент:

$$Mk = \frac{97,4 \times 2 \times k \times U^2 \times R'_{RA1}}{n \times (R_{A1}^2 + X_{A1}^2)} \times \frac{R'_{B1} \times X_{A1} - X'_{B1} \times R_{A1}}{R_{B1}'^2 + X_{B1}'^2} = 2 \times A \times \frac{R'_{B1} \times X_{A1} - X'_{B1} \times R_{A1}}{R_{B1}'^2 + X_{B1}'^2} \quad (1.31)$$

где

$$A = \frac{97,4 \times 2 \times k \times U^2 \times R'_{RA1}}{n \times (R_{A1}^2 + X_{A1}^2)} \quad (1.32)$$

– постоянная фазы B , не зависящая от параметров, в том числе и величины емкости. Так как X'_{B1} отрицательно, то оба члена числителя всегда складываются, т. е. если брать абсолютную величину X'_{B1} , то перед ней в числителе (1.31) нужно поставить знак $+$. Дифференцируя Mk по X'_{B1} и приравняв производную нулю, получаем значение:

$$X'_{B1m} = \frac{R'_{B1}}{R_{A1}} \times \left(X_{A1} - \sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} \right) = \frac{k^2 \times R_C}{R_{A1}} \times \left(X_{A1} - \sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} \right) \quad (1.33)$$

– необходимое для получения максимального пускового момента. Емкостное сопротивление пускового конденсатора по абсолютной величине:

$$|X_{Cm}| = |X'_{B1}| + X_{B1} = |X'_{B1m}| + k^2 \times X_{A1} \quad (1.34)$$

и его емкость

$$C_m = \frac{10^6}{314 \times X_C} \quad (1.35)$$

Подставим значение X'_{B1} из (1.33) в (1.32) находим после простых преобразований максимальный пусковой момент:

$$M_{kt} = A \times \frac{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} + X_{A1}}{R'_{B1}} = A \times \frac{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} + X_{A1}}{k^2 \times R_{A1} + R'_C} \quad (1.36)$$

В приложении 2 показано, что линейный пусковой ток:

$$Ik = I_{Ak} \times \frac{\sqrt{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X'_{B1})^2}}{R'^2 + X'^2_{B1}} \quad (1.37)$$

где

$$I_{Ak} = \frac{U}{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2}} \quad (1.38)$$

Если брать абсолютную величину X'_{B1} , то в числителе подкоренного выражения в (1.37) нужно перед X'_{B1} брать знак минус.

При нормальных соотношениях параметров максимальный пусковой момент получается весьма большим, в 4 – 5 раз больше номинального, но и требующаяся для этого емкость также имеет значительную величину, что удорожает двигатель. В большинстве случаев вполне достаточно ограничиться кратностью пускового момента $m_k = 2 - 3$, а часто и еще меньшей, что приводит к уменьшению необходимой емкости и тем самым к удешевлению машины. Даже для получения более высоких значений m_k не выгодно выбирать именно m_{km} , так как это значение не является оптимальным. Подробнее этот вопрос освещен далее на конкретном примере.

Получение заданного пускового момента.

Если кратность пускового момента m_k задана, то по ней и известному уже значению номинального момента (1.16) легко определить

$$M_k = m_k \times M_n$$

Тогда, решая (1.31) относительно X'_{B1} найдем его значение:

$$\begin{aligned} X'_{B1M} &= \frac{-A \times R_{A1} - \sqrt{A^2 \times R_{A1}^2 - M_k \times (M_k \times R_{B1}'^2 - 2 \times A \times R'_{B1} \times X_{A1})}}{M_k} = \\ &= \frac{-A \times R_{A1} - \sqrt{A^2 \times R_{A1}^2 - M_k \times k^2 \times R_{A1} \times (M_k \times k^2 \times R_{A1} - 2 \times A \times X_{A1})}}{M_k} \end{aligned} \quad (1.39)$$

Емкостное сопротивление конденсатора:

$$|X_{CM}| = |X'_{B1M}| + k^2 \times X_{A1} \quad (1.40)$$

и емкость

$$C_M = \frac{10^6}{314 \times X_{CM}}$$

Пусковой ток определяется по (1.37).

Получение заданной кратности пускового тока.

В некоторых случаях эксплуатационной практики на первое место выдвигается требование ограничения кратности пускового тока

$$ik = \frac{Ik}{I_H}$$

Из (1.37) следует:

$$Ik = \frac{Ik}{I_H} = \frac{I_{Ak}}{I_H} \times \frac{\sqrt{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X'_{B1})^2}}{R'^2 + X'^2_{B1}} = ci \times \frac{\sqrt{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X'_{B1})^2}}{R'^2 + X'^2_{B1}}$$

где

$$ci = \frac{I_{AK}}{I_H}$$

известно из расчета главной обмотки. Тогда:

$$i_k^2 = ci^2 \times \frac{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X'_{B1})^2}{R'^2_{B1} + X'^2_{B1}} \quad (1.41)$$

Решая это уравнение находим X'_{B1} необходимое для получения заданной величины i_k :

$$X'_{B1i} = \frac{ci^2 \times X_{A1} + \sqrt{(i_k^2 - ci^2) \times [ci^2 \times (R_{A1} + R'_{B1})^2 - i_k^2 \times R'^2_{B1}] + i_k^2 \times ci^2 \times X_{A1}^2}}{i_k^2 - ci^2} \quad (1.42)$$

Получающийся при этом пусковой момент M_{ki} определяется по (1.31). Очевидно, нижним пределом i_k является значение ci , когда вспомогательная фаза разомкнута. При этом пусковой момент равен нулю. Лишь при малых емкостях, т. е. больших емкостных сопротивлениях, например при пуске в ход только при помощи рабочего конденсатора, сдвиг фаз между токами I_{Ak} и I_{Bk} становится больше 90° и линейный пусковой ток имеет величину, меньшую чем I_{Ak} . Но и в этом случае вследствие малой величины I_{Bk} (большое емкостное сопротивление в фазе B) различие между i_k и I_{Ak} мало.

Во всех рассмотренных случаях необходимо также проверять напряжение на конденсаторе:

$$U_K = I_{Bk} \times \sqrt{R_c^2 + X_c^2} \approx I_{Bk} \times X_c \quad (1.43)$$

где

$$I_{Bk} = \frac{U}{\sqrt{R'^2_{B1} + X'^2_{B1}}}$$

т. е.

$$U_K = \frac{U \times X_c}{\sqrt{R'^2_{B1} + X'^2_{B1}}} \quad (1.44)$$

Микродвигатель с конденсаторным пуском.

Методика выбора емкости пускового конденсатора не отличается в этом случае ничем от уже рассмотренной в предыдущем разделе. Однако здесь несколько осложняется расчет коэффициента трансформации k , поскольку он производился ранее исходя из условий симметричности режима при номинальной мощности, тогда как здесь номинальная работа происходит при отключенной пусковой фазе.

Анализ выведенных выше уравнений, для максимального пускового момента, момента приданной емкости и пускового тока показывает, что с увеличением k пусковой момент при неизменной емкости сперва несколько увеличивается, затем снова падает, максимальный момент падает значительно и пусковой ток (при неизменной емкости) растет. Сказанное иллюстрирует кривыми рис. 4 построенными для конденсаторного микродвигателя рассчитанного далее.

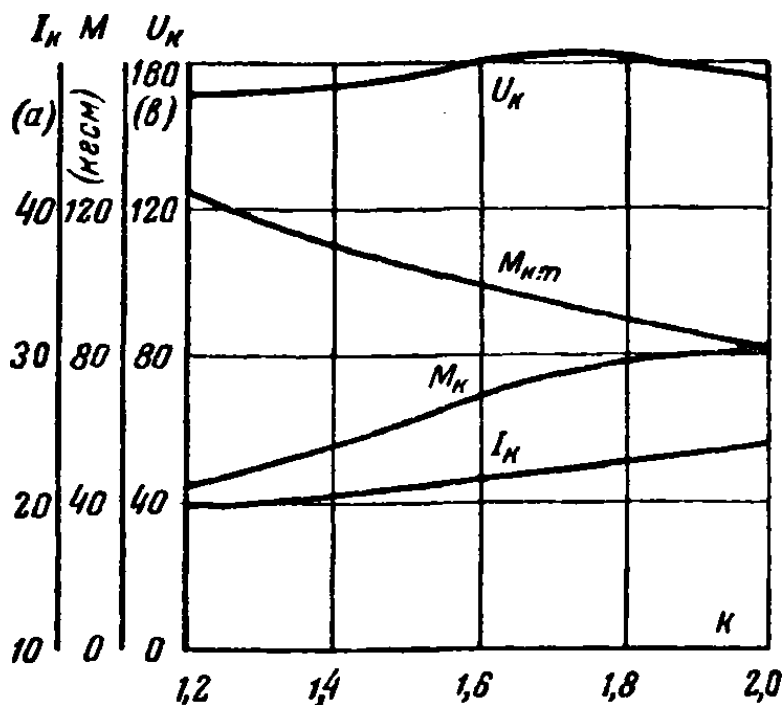


Рис. 4.

Кривые M_k и I_k построены при емкости $C = 126 \text{ мкф} = \text{const}$. Таким образом, с точки зрения получения заданного пускового момента, если он конечно меньше максимального, некоторое увеличение k выгодно, так как приводит к уменьшению необходимой емкости. С другой стороны здесь нужно быть осторожным, так как увеличение k приводит к увеличению коэффициента заполнения паза, поскольку оно связано с увеличением числа проводников в пазу, следовательно и с увеличением пространства занятого проводниковой изоляцией. Это обстоятельство может полностью нейтрализовать выгоду увеличения k (вследствие удорожания провода и обмоточных работ), а при значительном увеличении k может даже привести к не возможности выполнения обмотки (слишком высокий коэффициент заполнения паза).

Так как в рассматриваемых в настоящем разделе двигателях вспомогательная обмотка работает только во время пуска в ход, то для экономии меди в ней можно допустить плотность тока большую, чем в главной обмотке. Для этого соотношение сечений проводников главной и пусковой обмоток нужно взять равным не k , как в конденсаторных двигателях, а t причем $t > k$.

В этом случае, сопротивление вспомогательной статорной обмотки:

$$R_{SB} = \rho \times \frac{2 \times l \times w_B}{Q_B} = \rho \times \frac{2 \times l \times w_A \times k}{\frac{Q_{At}}{t}} = k \times t \times R_{SA} \quad (2.1)$$

где l – длина полувитка (одинаковая для обеих обмоток), Q_A и Q_B – сечения проводника обмоток A и B . Так как:

$$I_B = \sqrt{\frac{1}{k} \times I_A^2}$$

то плотность тока в проводниках вспомогательной обмотки статора:

$$\Delta_B = \frac{I_B}{Q_B} = \frac{\frac{1}{k} \times I_A}{\frac{1}{t} \times Q_A} = \frac{t}{k} \times \frac{I_A}{Q_A} = \frac{t}{k} \times \Delta_A \quad (2.2)$$

Увеличение плотности тока в обмотке B имеет то преимущество, что даже при относительно большом значении k коэффициент заполнения паза не увеличивается, что облегчает и удешевляет изготовление обмотки. Выбор t нужно доводить так, чтобы отношение t/k составляло 1,2 – 1,5 и лишь для двигателей с малым числом пусков можно доводить это отношение до 1,8. Влияние величины t на пусковые свойства машины не значительно, как это видно по кривым рис. 5, построенным для того же двигателя, что и на рис. 4.

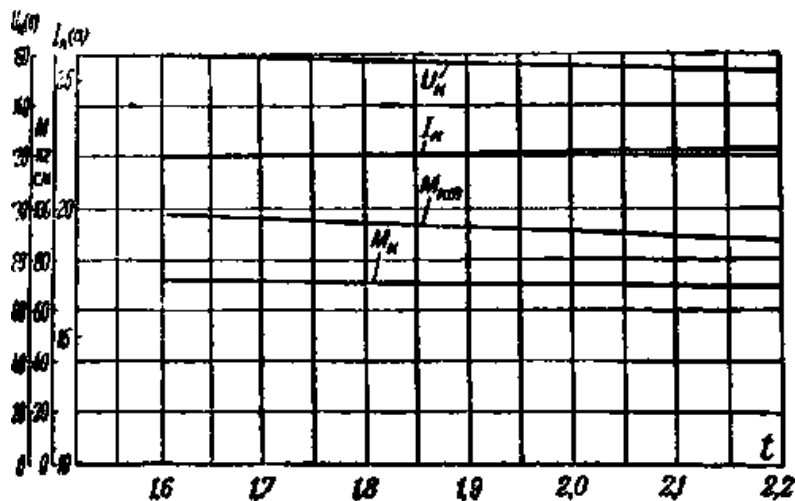


Рис. 5.

По мнению автора наилучшим решением вопроса о величине коэффициента трансформации k будет следующее:

1. Если двигатель должен быть универсальной т. е. если машина должна быть спроектирована так, чтобы путем присоединения к ней либо постоянно включенного конденсатора, либо только пускового конденсатора, либо внешнего сопротивления получался или конденсаторный двигатель или двигатель с конденсаторным пуском, или наконец, двигатель с реостатным пуском, целесообразно выбирать значение k по (1.10) т. е. исходя из условий симметричной работы в режиме конденсаторного двигателя. Этот путь является наиболее целесообразным при массовом изготовлении машин широкого применения, так как позволяет ограничиться производством лишь одной единственной серии. На щитке каждой машины должны быть указаны две мощности – при работе в качестве конденсаторного двигателя и в качестве только однофазного (с пусковым конденсатором или сопротивлением отключаемым после пуска).

Одновременно должно быть поставлено производство стандартных элементов (конденсаторов и сопротивлений) и в каталоге должны быть указаны рабочие и пусковые свойства, получаемые при подключении к машине этих внешних элементов.

2. Если двигатель строится индивидуально и притом только для работы в только однофазном режиме (с отключением пусковой обмотки), то для машин с конденсаторным пуском значение k , получаемое по (1.10), следует несколько повысить

и одновременно выбрать t так, чтобы отношение k/t составляло величину, указанную выше.

3. Для получения возможно большего пускового момента (конечно за счет увеличения емкости) значение k нужно уменьшить.

Во втором случае все формулы раздела также сохраняют силу и изменится лишь величина R'_{B1} которая теперь будет:

$$R'_{B1} = k \times t \times R'_{SA} + k^2 \times R'_{RA1} + R_C \quad (2.3)$$

Пример расчета показан далее.

Микродвигатель с реостатным пуском.

При выборе коэффициента трансформации k здесь также следует учитывать, является ли двигатель универсальным или он будет работать только как однофазный с отключаемым пусковым сопротивлением.

В первом случае остаются в силе все те соображения, которые были высказаны выше, но при этом необходимо иметь в виду, что при реостатном пуске такой двигатель сможет развить (при надлежащем выборе пускового сопротивления) максимальный пусковой момент не свыше 0,7 – 1,3 от номинального. Впрочем, значительное число приводов и не требует пускового момента большей величины.

При проектировании машины только для работы в качестве двигателя с реостатным пуском выгодно уменьшать k , так как максимальный пусковой момент при этом увеличивается. Целесообразнее всего выбирать в этом случае $k = 1$, т. е. взять одинаковые числа витков у обеих обмоток. Это дает возможность довести кратность максимального пускового момента иногда до значения 1,8 – 2,2, но конечно и пусковой ток при этом возрастет. Интересно отметить, что при определенной кратности пускового момента коэффициент трансформации не влияет на величину пускового тока, если, конечно m_k таково что оно не превосходит m_{km} для верхнего значения рассматриваемого диапазона коэффициентов трансформации k . Физически это явление вполне понятно, так как при изменении k происходит лишь перераспределение активного сопротивления всей пусковой цепи между самой обмоткой и добавочным сопротивлением, но общая величина его, которая и определяет пусковой момент при данном пусковом токе, остается неизменной. Очевидно также, что уменьшая сечение пусковой обмотки, т. е. выбирая $t > k$, можно уменьшить величину внешнего добавочного сопротивления (реостата) и даже довести его до нуля.

Сохраняя для добавочного сопротивления в фазе B то же обозначение R_C , получим следующие расчетные параметры:

$$\left. \begin{aligned} R_{A1} &= R_{SA} + R'_{RA1} \\ R'_{B1} &= R_{B1} + R_C = R_{SB} + R'_{RB1} + R_C = k^2 \times R_C \text{ при } t = k \\ R'_{B1} &= R_{B1} + R_C = k \times t \times R_{SA} + k^2 \times R'_{RA1} + R_C \text{ при } t \neq k \\ X_{A1} &= X_{SA} + X'_{RA1} \\ X_{R1} &= X_{SB} + X'_{RB1} = k^2 \times X_{A1} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Подставив в (1.31) вместо $X'm$ величину X_{B1} (всегда положительную), получим следующее общее выражение для пускового момента:

$$Mk = 2 \times A \times \frac{R'_{B1} - X_{B1} \times R_{A1}}{R'^2_{B1} + X^2_{B1}} \quad (3.2)$$

где постоянная A определяется по (1.32). Дифференцируя Mk по R'_{B1} и приравнявая производную нулю получим:

$$R'_{B1} = \frac{X_{b1}}{X_{A1}} \times \left(R_{A1} + \sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} \right) = k^2 \times \left(R_{A1} + \sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} \right) \quad (3.3)$$

Величина добавочного сопротивления:

$$R_{cm} = R'_{B1m} - R_{B1} \quad (3.4)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} R_{B1} &= k^2 \times R_{A1} \text{ при } k = t \\ R_{B1} &= k \times t \times R_{SA} + k^2 \times R'_{RA1} \text{ при } k \neq t \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Подставляя найденное значение в X'_{RBm} , получаем максимальный пусковой момент:

$$Mk = A \times \frac{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} - R_{A1}}{X_{B1}} = A \times \frac{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2} - R_{A1}}{k^2 \times X_{A1}} \quad (3.6)$$

Пусковой ток по прежнему определяется уравнением:

$$I_R = I_{Ak} \times \sqrt{\frac{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X_{B1})^2}{R_{B1}^2 + X_{B1}^2}} \quad (3.7)$$

где:

$$I_{Ak} = \frac{U}{\sqrt{R_{A1}^2 + X_{A1}^2}} \quad (3.8)$$

Для определения сопротивления соответствующего заданной кратности пускового момента m_k решаем (3.2) относительно R'_{B1} что дает:

$$R'_{B1M} = \frac{A \times X_{A1} + \sqrt{A^2 \times X_{A1}^2 - Mk \times (Mk \times X_{B1}^2 + 2 \times A \times X_{B1} \times R_{A1})}}{Mk} \quad (3.9)$$

Добавочное сопротивление:

$$R_{cm} = R'_{B1M} - R_{B1} \quad (3.10)$$

Пусковой ток определяется по (3.7).

Наконец сопротивление соответствующе заданной кратности пускового тока i_k определяется путем решения уравнения:

$$i_k = ci \times \frac{\sqrt{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X_{B1})^2}}{R_{B1}^2 + X_{B1}^2}$$

относительно R'_{B1} , что дает:

$$R'_{B1i} = \frac{ci^2 \times R_{A1} \times \sqrt{(i_k^2 - ci^2) \times [ci^2 \times (X_{A1} + X_{B1})^2 - i_k^2 \times X_{B1}^2]} + i_k^2 \times ci^2 \times R_{B1}}{i_k^2 - ci^2} \quad (3.11)$$

Напряжение на добавочном сопротивлении R_c :

$$U_R = \frac{U \times R_c}{\sqrt{R_{B1}^2 + X_{B1}^2}} \quad (3.12)$$

Выбирая, как указано выше, $t > k$, т. е. уменьшая сечение проводников вспомогательной обмотки в t/k раз, можно часть добавочного внешнего сопротивления R_C или даже все сопротивление R_C перенести в саму обмотку. Необходимую для этого величину t можно найти следующим образом. Общее сопротивление пусковой цепи при $t = k$:

$$R'_{B1} = k^2 \times R_{SA} + k^2 \times R'_{RA1} + R_C \quad (3.13)$$

При $t \neq k$ и $R_C = 0$ это сопротивление будет составлять:

$$R'_{B1} = k \times t \times R_{SA} + k^2 \times R'_{RA1} \quad (3.14)$$

Приравнявая обе величины, находим:

$$t = \frac{k^2 \times R_{SA} + R_C}{k \times R_{SA}} = k + \frac{R_C}{k \times R_{SA}} \quad (3.15)$$

Это уравнение показывает, что перенос сопротивления R_C целиком в пусковую обмотку, т. е. отказ от внешнего сопротивления возможен лишь в том случае, когда отношение $R_C/k \times R_{SA}$ не велико, так как увеличивать плотность тока в пусковой обмотке более чем на 50 – 80% не рекомендуется. Если ограничиться переносом в обмотку части сопротивления R_C равной R'_C , то (3.15) перейдет в

$$t = k + \frac{R_C}{k \times R_{SA}} \quad (3.16)$$

и позволит получить в пусковой обмотке меньшую плотность тока, чем в первом случае. Упомянем еще о способе, позволяющем получить в обмотке приемлемую плотность тока даже при значительном повышении его сопротивления. Этого можно достичь, изготавливая пусковую обмотку не из меди, а из металла с повышенным удельным сопротивлением, например латуни. В прочем этот метод является скорее теоретическим, так как требует изготовления по специальному заказу изолированного латунного или иного провода, что может привести к большим дополнительным затратам и к значительному повышению стоимости двигателя.

Необходимо отметить, что, вообще говоря, переносить R_C или R'_C в обмотку нужно с большой осторожностью, так как при этом тепло выделяющееся при пуске в ход, целиком локализуется внутри самой машины и может вызвать не допустимый перегрев двигателя, особенно при частых пусках. В частности, это может оказаться весьма опасным в микродвигателях совершенно закрытого типа.

Вывод уравнения для $I^2_{A1} - I^2_{A2}$ при пуске в ход. Пользуясь обозначениями выше находим при $s = 1$:

$$\begin{aligned} I^2_{A1} - I^2_{A2} &= I'^2_{A1} + I''^2_{A1} - I'^2_{A2} - I''^2_{A2} = U^2 \times \frac{(a_1 \times Q + a_2 \times S)^2 + (a_2 \times Q - a_1 \times S)^2 - (a_2 - a + 2 \times S)^2}{(Q^2 + S^2)^2} = \\ &= U^2 \times \frac{a_1^2 + a_2^2 - a_3^2 - a_4^2}{Q^2 + S^2} = U^2 \times \frac{(R'_{B1} + k \times X_{A1})^2 + (X'_{B1} - k \times R_{A1})^2 - (R'_{B1} - k \times X_{A1})^2 - (X'_{B1} + k \times R_{A1})^2}{Q^2 + S^2} = \\ &= 4 \times k \times U^2 \times \frac{R'_{B1} \times X_{A1} - X'_{B1} \times R_{A1}}{Q^2 + S^2} \end{aligned}$$

Так как при $s = 1$

$$\begin{aligned} Q &= 2 \times R_{A1} \times R'_{B1} - 2 \times X_{A1} \times X'_{B1} = 2 \times (R_{A1} \times R'_{B1} - X_{A1} \times X'_{B1}) \\ S &= 2 \times R_{A1} \times X'_{B1} + 2 \times R'_{B1} \times X_{A1} = 2 \times (R_{A1} \times X'_{B1} + R'_{B1} \times X_{A1}) \end{aligned}$$

то после подстановки и не сложных преобразований получим:

$$I_{A1}^2 - I_{A2}^2 = k \times U^2 \times \frac{R'_{B1} \times X_{A1} - X'_{B1} \times R_{A1}}{(R_{A1}^2 + X_{A1}^2) \times (R_{B1}^2 + X_{B1}^2)}$$

Вывод уравнения для пускового тока. При пуске в ход линейный ток

$$i_k = i_{Ak} + i_{Bk}$$

Так как

$$\frac{i_{Ak}}{i_{Bk}} = \frac{R'_{B1} + j \times X'_{B1}}{R_{A1} + j \times X_{A1}} \quad \text{то} \quad i_{Bk} = i_{Ak} \times \frac{R_{A1} + j \times X_{A1}}{R'_{B1} + j \times X'_{B1}}$$

и

$$i_k = i_{Ak} \times \left(1 + \frac{R_{A1} + j \times X_{A1}}{R'_{B1} + j \times X'_{B1}} \right) = i_{Ak} \times \frac{(R_{A1} + R'_{B1}) + j \times (X_{A1} + X'_{B1})}{R'_{B1} + j \times X'_{B1}}$$

или

$$I_k = I_{Ak} \times \sqrt{\frac{(R_{A1} + R'_{B1})^2 + (X_{A1} + X'_{B1})^2}{R_{B1}'^2 + X_{B1}'^2}}$$

Пример расчета для конденсаторного микродвигателя мощностью 350 *вт*.

Конденсаторный микродвигатель имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{2н} = 350 \text{ вт}$, номинальное напряжение $U = 120 \text{ в}$, число полюсов $2p = 4$, номинальное скольжение $s_H = 0,01$. При расчете машины, как симметричного двухфазного двигателя, найдены следующие параметры главной цепи; $R_{SA} = 1,47$; $X_{SA} = 1,92$; $R_{RA} = 2,68$; $X_{RA} = 1,85$; $X_m = 35 \text{ Ом}$. Потери в стали статора $P_{CS} = 16 \text{ вт}$, механические потери $P_{мех} = 10 \text{ вт}$. Расчет рабочего конденсатора и характеристик номинального режима:

$$R'_{RA1} = \frac{35^2 \times \frac{2,68}{0,04}}{\left(\frac{2,68}{0,04}\right)^2 + (35 + 1,85)^2} = 14 \text{ Ом}$$

$$X'_{RA1} = \frac{35 \times \left(\frac{2,68}{0,04}\right)^2 + 35 \times 1,85 \times (35 + 1,85)}{\left(\frac{2,68}{0,04}\right)^2 + (35 + 1,85)^2} = 27,3 \text{ Ом}$$

Сопротивление конденсатора предварительно примем $R_C = 8 \text{ Ом}$.

$$R_{A1} = 1,74 + 14 = 15,47 \text{ Ом} \quad X_{A1} = 1,92 + 27,3 = 29,22 \text{ Ом}$$

$$k = \frac{29,22 + \sqrt{29,22^2 - 4 \times 15,47 \times 8}}{2 \times 15,47} = 1,56$$

$$-X_C = 1,56 \times 15,47 + 1,56^2 \times 29,22 = 95 \text{ Ом} \quad C = \frac{10^6}{314 \times 95} = 33,6 \text{ мкф}$$

Конденсатор ближайшей каталожной емкости 30 *мкф* имеет $R_C = 6 \text{ ом}$. Производим пересчет:

$$k = \frac{29,22 + \sqrt{29,22^2 - 4 \times 15,47 \times 6}}{2 \times 15,47} = 1,66$$

$$-X_C = 1,66 \times 15,47 + 1,66^2 \times 29,22 = 106,2 \text{ Ом} \quad C = \frac{10^6}{314 \times 106,2} = 30 \text{ мкФ}$$

На этом значении и останавливаемся.

$$I_{AH} = \frac{120}{\sqrt{15,47^2 + 29,22^2}} = 3,62 \text{ А} \quad I_{BH} = \frac{3,62}{1,66} = 2,18 \text{ А}$$

$$I_H = \sqrt{3,62^2 + 2,18^2} = 4,22 \text{ А} \quad P_{12H} = 2 \times 3,62^2 \times 14 = 367 \text{ Вт}$$

$$M_H = \frac{97,4 \times 367}{1500} = 23,8 \text{ кг} \times \text{см.} \quad U_K = 2,18 \times 106,2 = 237 \text{ В}$$

т. е. конденсатор должен быть выбран на номинальное напряжение 250 в:

$$P_{MSH} = 2 \times 3,62^2 \times 1,47 = 38,5 \text{ Вт} \quad P_{MRH} = 0,04 \times 367 = 14,7 \text{ Вт}$$

$$P_{KM} = 2,18^2 \times 6 = 28,5 \text{ Вт}$$

$$P_{1H} = 367 + 38,5 + 28,5 + 16 = 450 \text{ Вт} \quad P_{2H} = 367 - 14,7 - 10 = 342,3 \text{ Вт}$$

$$\eta = \frac{342,3}{450} = 0,762 \quad \cos \varphi_H = \frac{342,3}{450} = 0,762 \quad \eta \times \cos \varphi_H = 0,677$$

На рис. 6 показано влияние изменения емкости на показатели машины при условии сохранения приблизительно симметричного режима, т. е. I, A , при $M \approx \text{const}$ и $P_{2H} \approx \text{const}$. Если желательно несколько удешевить двигатель, можно пойти на снижение емкости до 25 мкФ, так как при дальнейшем ее уменьшении придется взять конденсатор уже на 300 в что может свести к нулю всю экономию. При переходе к емкости 25 мкФ произойдет уменьшение $\cos \varphi$ на 8,9%, $\eta \times \cos \varphi$ на 9,3% и увеличение напряжения на конденсаторе на 7,2%.

Расчет пускового конденсатора и пусковых характеристик.

При пуске в ход $s = 1$:

$$R'_{RA1} = \frac{35^2 \times 2,68}{2,68^2 + (35 + 1,86)^2} = 2,49 \text{ Ом}$$

$$X'_{RA1} = \frac{35 \times 2,68^2 + 35 \times 1,86 \times (35 + 1,86)}{2,68^2 + (35 + 1,86)^2} = 1,94 \text{ Ом}$$

$$R_{A1} = 1,47 + 2,49 = 3,96 \text{ Ом} \quad X_{A1} = 1,92 + 1,94 = 3,86 \text{ Ом}$$

Примем $R_C = 1$ (электролитический конденсатор), тогда:

$$R'_{B1} = 1,66^2 \times 3,96 + 1 = 11,9 \text{ Ом} \quad X_{B1} = 1,66^2 \times 3,86 = 10,6 \text{ Ом}$$

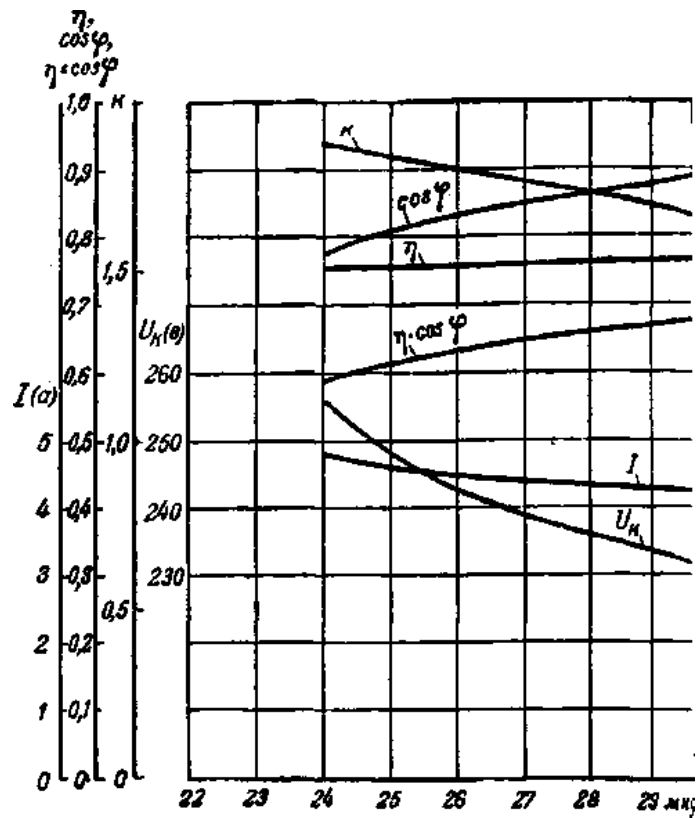


Рис. 6.

Постоянная момента:

$$A = \frac{97,4 \times 1,66 \times 120^2 \times 2,49}{1500 \times (3,96^2 + 3,86^2)} = 123$$

$$X'_{B1m} = \frac{11,9}{3,96} \times (3,86 - \sqrt{3,96^2 + 3,86^2}) = -5,02 \text{ Ом}$$

$$|X_{Cm}| = 5,02 + 10,6 = 15,62 \text{ Ом} \quad C_m = \frac{10^6}{314 \times 15,62} = 204 \text{ мкФ}$$

Максимальный пусковой момент:

$$Mk_m = 123 \times \frac{\sqrt{3,96^2 + 3,86^2} + 3,86}{11,9} = 97,1 \text{ кг} \times \text{см.} \quad m_{k_m} = \frac{97,1}{23,8} = 4,08$$

Пусковой ток фазы А:

$$I_{Ak} = \frac{120}{\sqrt{3,96^2 + 3,86^2}} = 21,7 \text{ А}$$

Линейный пусковой ток:

$$I_k = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 11,9)^2 + (3,86 - 5,02)^2}{11,9^2 + 5,02^2}} = 26,7 \text{ А}$$

Кратность пускового тока:

$$i_k = \frac{26,7}{4,22} = 6,33$$

Полученная кратность пускового момента нужна лишь в исключительных случаях. В обычной практике можно вполне удовлетвориться величиной $m_k = 3$, т. е. пусковым моментом $3 \times 23,8 = 71,4 \text{ кг} \times \text{см}$. Для этого потребуется:

$$X'_{B1M} = \frac{-123 \times 3,96 - \sqrt{123^2 \times 3,96^2 - 71,4 \times (71,4 \times 11,9^2 - 2 \times 123 \times 11,9 \times 3,86)}}{71,4} = -14,75 \text{ Ом}$$

$$|X_{CM}| = 14,75 + 10,6 = 25,35 \text{ Ом} \quad C_M = \frac{10^6}{314 \times 25,35} = 126 \text{ мкф}$$

Ближайшая каталожная емкость 125 мкф настолько близка, что пересчет можно не производить. Пусковой ток:

$$I_{kM} = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 11,9)^2 + (3,86 - 14,75)^2}{11,9^2 + 14,75^2}} = 22,1 \text{ А} \quad i_{kM} = \frac{22,1}{4,22} = 5,25$$

Так как полученное значение близко к своему теоретическому пределу $ci = 21,7/4,22 = 5,15$ то дальнейшее уменьшение пускового тока практически невозможно.

Выясним еще вопрос о пусковых характеристиках, тогда пуск производится только с рабочим конденсатором без всякой дополнительной емкости. Выше было найдено, что емкость рабочего конденсатора $C = 30 \text{ мкф}$ и его сопротивления $X_C = -106,2 \text{ Ом}$, $R_C = 6 \text{ Ом}$. В этом случае:

$$R_{B1} = 1,66^2 \times 3,96 + 6 = 16,9 \text{ Ом} \quad X'_{B1} = 106,2 + 10,6 = -95,6 \text{ Ом}$$

Пусковой момент:

$$Mk = 123 \times 2 \times \frac{16,9 \times 3,86 + 95,6 \times 3,96}{16,9^2 + 95,6^2} = 11,6 \text{ кг} \times \text{см}. \quad m_k = \frac{11,6}{23,8} = 0,49$$

Пусковой ток:

$$I_{kM} = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 11,9)^2 + (3,86 - 95,6)^2}{11,9^2 + 95,6^2}} = 21 \text{ А} \quad i_{kM} = \frac{21}{4,22} = 5$$

Если характер привода таков, что двигатель пускается в холостую или с незначительной нагрузкой, то последнее решение является наиболее экономичным, так как задает стоимость пускового конденсатора и центробежного выключателя.

Определим для трех рассмотренных случаев напряжение на конденсаторе при пуске в ход.

В первом случае (максимальный пусковой момент):

$$U_K = \frac{120 \times 15,62}{\sqrt{11,9^2 + 5,02^2}} = 145 \text{ В}$$

Во втором случае ($m_k = 3$):

$$U_K = \frac{120 \times 25,35}{\sqrt{11,9^2 + 14,75^2}} = 160 \text{ В}$$

В третьем случае (рабочий конденсатор):

$$U_K = \frac{120 \times 106,2}{\sqrt{16,9^2 + 95,6^2}} = 130 \text{ В}$$

По этим напряжениям и нужно подбирать конденсаторы (за исключением третьего случая, в котором U_k определяется рабочим, см. выше, режимом). На рис. 7 показано изменение пусковых свойств двигателя в зависимости от емкости пускового конденсатора. Из кривых ясно видно, что даже в том случае, когда требуется возможно более высокий пусковой момент подбирать емкость конденсатора по m_{km} не целесообразно. Гораздо выгоднее подобрать ее так, чтобы получить максимальное значение отношения M_k/I_k . При этом условии m_k мало отличается от m_{km} , но зато емкость уменьшается значительно. В рассматриваемом примере отношение M_k/I_k становится максимальным при пусковом конденсаторе 168 мкф. Таким образом, по сравнению с точкой m_{km} емкость уменьшается на 17,5%, в то время как момент падает всего на 4,4%. При этом пусковой ток уменьшается на 7,7%, а напряжение на конденсаторе повышается на 6,4%.

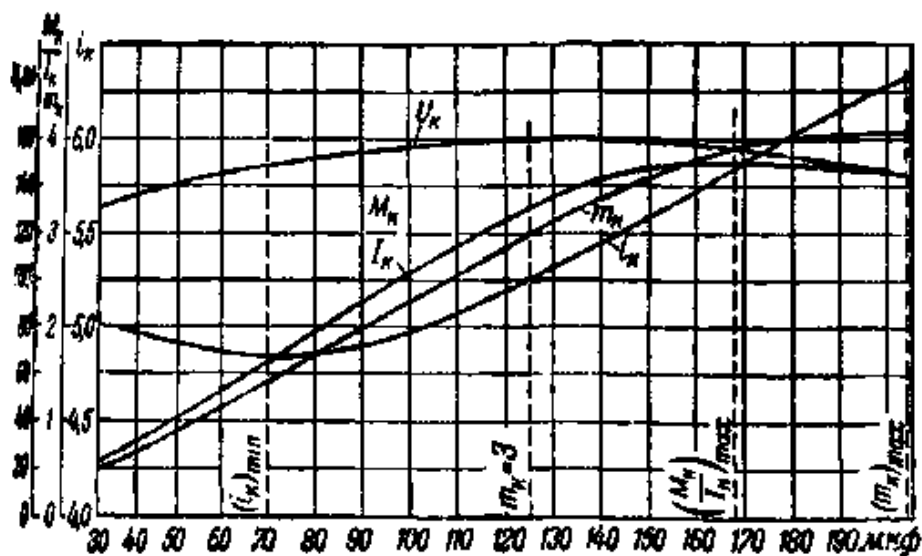


Рис. 7.

Для того чтобы учесть все особенности пускового режима и подобрать конденсатор, соответствующий оптимальным условиям пуска, рекомендуется не ограничиваться расчетом емкости лишь для какого-либо одного случая, а построить кривые (что не составляет большого труда) и лишь после этого принять определенное решение.

Пример расчета конденсаторного и реостатного пуска для двигателя с отключением пусковой фазы.

Для расчетов воспользуемся данными микродвигателя рассмотренного ранее. Номинальная мощность этого двигателя теперь разумеется понизится, так как вспомогательная обмотка после пуска отключается. Номинальный момент составляет теперь 14,2 кг×см. и номинальный ток 4,4 А (подробный расчет за недостатком места не приводится).

Расчет пускового конденсатора.

Если принять коэффициент трансформации равным прежнему значению ($k = 1,66$), то абсолютные значения емкостей, пусковых моментов, токов и напряжений на конденсаторе не изменятся по сравнению с величинами, полученными в предыдущем расчете, но относительные величины будут конечно, другими. Так максимальный момент, составляющий, как и прежде 97,1 кг×см., будет соответствовать теперь кратности:

$$m_{km} = \frac{97,1}{14,2} = 6,84$$

и кратности пускового тока:

$$i_{km} = \frac{26,7}{4,4} = 6,08$$

Для получения трехкратного пускового момента, т. е. $Mk = 42,6 \text{ кг}\times\text{см.}$ потребуется теперь емкость 84 мкф (эту $42,6$ величину легко найти из рис. 7 для $m_k = 42,6/23,8 = 1,79$, так как кривые дают кратности при номинальном моменте $23,8 \text{ кг}\times\text{см.}$). При этом получится кратность пускового тока (по рис. 7):

$$i_k = \frac{4,75 \times 4,22}{4,4} = 4,55$$

Влияние увеличения k показано на рис. 4. Легко подсчитать, что при $k = 1,8$, т. е. при

$$A = \frac{123 \times 1,8}{1,66} = 133,5$$

тот же момент $42,6 \text{ кг}\times\text{см.}$ получится при

$$X'_{B1} = \frac{-138,5 \times 3,96 - \sqrt{133,5^2 \times 3,96^2 - 42,6 \times 1,8^2 \times 3,96 \times (42,6 \times 1,8^2 \times 3,96 - 2 \times 133,5 \times 3,86)}}{42,6} = -29,7 \text{ Ом}$$

$$X_C = -29,7 - 10,6 = -40,5 \text{ Ом} \quad C = \frac{10^6}{314 \times 40,5} = 79 \text{ мкф}$$

т. е. увеличение k на $8,5\%$ снизит емкость на 6% . Если увеличить k до $2,5$, т. е. на 50% , то при том же моменте $42,6 \text{ кг}\times\text{см.}$ потребуется емкость 65 мкф , или на 22% меньше, что весьма существенно. Однако, при столь большом увеличении коэффициента трансформации размещение проводников в пазу будет затруднено. Делу можно помочь, если уменьшить сечение проводников пусковой обмотки. При $k = 2,5$ следует взять t равным по крайней мере 3 . Тогда при пуске в ход плотность тока в пусковой обмотке возрастет в $3/2,5 = 1,2$ раза. При $t = 3$ изменится R'_{B1} , которое станет теперь равным: $2,5 \times 3 \times 1,47 + 2,5^2 \times 2,49 + 1 = 27,6 \text{ Ом}$. Для получения прежнего момента потребуется (при $A = 123 \times 2,5 / 1,66 = 185$):

$$X'_{B1} = \frac{-185 \times 3,96 - \sqrt{(185 \times 3,96)^2 - 42,6 \times (42,6 \times 27,6^2 - 2 \times 185 \times 27,6 \times 3,86)}}{42,6} = -38,6 \text{ Ом}$$

$$X_C = -38,6 - 10,6 = -49,2 \text{ Ом} \quad C = \frac{10^6}{314 \times 49,2} = 64,8 \text{ мкф}$$

т. е. практически та же емкость, что и при $t = k = 2,5$. Напряжение на конденсаторе:

$$U_K = \frac{120 \times 49,2}{\sqrt{27,6^2 + 38,6^2}} = 124 \text{ В}$$

т. е. стало меньше, чем при том же моменте, $k = 1,66$ и емкости (из кривых рис. 7 U_K для этой точки составляет 152 В). Из этого примера ясно видна выгода увеличения k при одновременном уменьшении сечения пусковой обмотки.

Расчет пускового сопротивления.

При первоначальном значении $k = 1,66$:

$$R_{B1} = 1,66^2 \times 3,96 = 10,9 \text{ Ом}$$

$$X_{B1} = 1,66^2 \times 3,86 = 10,6 \text{ Ом}$$

и максимальный пусковой момент наступает при:

$$R'_{B1m} = 1,66^2 \times \left(3,96 + \sqrt{3,96^2 + 3,86^2} \right) = 26,2 \text{ Ом}$$

то есть потребуется добавочное сопротивление:

$$R_{cm} = 26,2 - 10,9 = 14,3 \text{ Ом}$$

Величина максимального пускового момента:

$$M_{km} = 123 \times \frac{\sqrt{3,96^2 + 3,86^2} - 3,96}{1,66^2 \times 3,86} = 18,15 \text{ кг} \times \text{см.}$$

$$m_{km} = \frac{18,15}{14,2} = 1,28$$

При этом пусковой ток:

$$I_{km} = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 26,2)^2 + (3,86 + 10,6)^2}{26,2^2 + 10,6^2}} = 25,7 \text{ А} \quad i_{km} = \frac{25,7}{4,4} = 5,83$$

Полученные соотношения весьма наглядно демонстрируют преимущества конденсаторного пуска перед реостатным. Увеличение k в данном случае не выгодно. В этом можно убедиться взяв, например, $k = 2,5$. Тогда:

$$R_{B1} = 2,5^2 \times 3,96 = 24,8 \text{ Ом} \quad A = \frac{123 \times 2,5}{1,66} = 185$$

$$R'_{B1m} = 2,5^2 \times (3,96^2 + \sqrt{3,96^2 + 3,86^2}) = 59,3 \text{ Ом}$$

$$R_c = 59,3 - 24,8 = 34,5 \text{ Ом}$$

$$M_{km} = \frac{185 \times (\sqrt{3,96^2 + 3,86^2} - 3,96)}{2,5^2 \times 3,86} = 12,05 \text{ кг} \times \text{см.} \quad m_{km} = \frac{12,05}{14,2} = 0,85$$

т. е. произошло резкое снижение максимального пускового момента. Легко показать, что при реостатном пуске выгодно не увеличение, а наоборот, уменьшение k . Если взять $k = 1$, иначе говоря, выполнить вспомогательную обмотку с тем же числом витков, что и главную, то пусковые характеристики изменятся следующим образом:

$$R_{B1} = R_{A1} = 3,96 \text{ Ом}$$

$$X_{B1} = X_{A1} = 3,86 \text{ Ом}$$

$$A = \frac{123}{1,66} = 74 \quad R'_{B1} = 3,96 + \sqrt{3,96^2 + 3,86^2} = 9,49 \text{ Ом}$$

$$R_C = 9,49 - 3,96 = 5,53 \text{ Ом}$$

$$M_{km} = \frac{74 \times (\sqrt{3,96^2 + 3,86^2} - 3,96)}{3,86} = 30,1 \text{ кг} \times \text{см.} \quad m_{km} = \frac{30,1}{14,2} = 2,12$$

т. е. максимальный пусковой момент значительно возрастает. Однако, при этом увеличится также и пусковой ток, который теперь будет:

$$I_k = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 9,49)^2 + (3,86 + 3,86)^2}{9,49^2 + 3,86^2}} = 32,8 \text{ А} \quad i_{km} = \frac{32,8}{4,4} = 7,45$$

Если при этом значении k желательно получить прежний момент $Mk = 18,15 \text{ кг} \times \text{см.}$, то потребуется:

$$X'_{B1} = \frac{74 \times 3,96 + \sqrt{(74 \times 3,86)^2 - 18,15 \times (18,5 \times 3,86^2 + 2 \times 74 \times 3,86 \times 3,96)}}{18,15} = 26,2 \text{ Ом}$$

$$R_C = 26,2 - 3,96 = 22,24 \text{ Ом}$$

Пусковой ток:

$$I_k = 21,7 \times \sqrt{\frac{(3,96 + 26,2)^2 + (3,86 + 3,86)^2}{26,2^2 + 3,86^2}} = 25,4 \text{ А} \quad i_{km} = \frac{25,7}{4,4} = 5,83$$

Таким образом, мы получили те же пусковые характеристики, что и при $k = 1,66$, но зато получили возможность при необходимости повысить пусковой момент почти вдвое. Это подтверждает положение о том, что изменение k при заданной величине пускового момента (если, конечно, этот момент не превосходит максимального момента, соответствующего верхнему пределу k) не влияет на пусковой ток и ведет лишь к перераспределению полного активного сопротивления пусковой цепи между обмоткой и добавочным сопротивлением (и в том и в другом случае мы получили $R'_{B1} = 26,2 \text{ Ом}$).